

지중 송전 케이블 선로임피던스 계산 및 실측

김남열*, 김정년, 허희덕, 이수길
LS전선(주)

The line impedance calculation and measurement of the underground transmission cable

Nam-Yul Kim*, Joung-Yun Kim, Hoi-Deok Heo, Su-Kil Lee
LS cable co. ltd

Abstract - The power system analysis based on the accurate impedance of the individual underground cable, which is the inter connected to a large power system, is required. A study on calculation method of impedance allowable current for underground cables. furthermore, various methods of bonding and earthing the sheath have been used for the purpose of eliminating or reducing the sheath losses. the effectes of bonding and earthing must be included in impedances. therefore, the subject of predicting thermal performance of soil and cable systems has been received increasing attention. for these problems, this paper describes a general formulation of impedance that is based on the effect of crossbonding and earthing of the sheath on the 66kV, 132kV and 220kV underground cable systems. also the work is presented, for calculating the temperature rise of power cable and soil.

1. 서 론

케이블의 시스는 선로 내 일정 구간별로 크로스 본딩과 접지가 되며 대부분의 영상분 임피던스는 시스로 흐르게 되기 때문에 크로스 본딩과 구간별 접지는 영상분 임피던스에 상당한 영향을 주게 된다. 그러나 만약 여러 장애요인이 존재하게 된다면 상당부분의 귀로전류는 대지를 통해 흐르게 될 것이다. 그러므로 선로정수를 검토할 때 대지귀로에 대한 부분은 중요한 변수로 작용한다.

본 논문에서 다룬 선로는 대기온도가 40℃인 고온전조한 중동지역에 건설한 지중계통으로서 환경적으로 온도에 의한 영향을 크게 받을 수 있는 지역이며 국내 계통에서 문제시 되었던 부분인 선로 구간별 거리를 최대한 일정하게 구성함으로써 불평형을 최소화한 선로이다. 특히 계통의 소 구간이 일정간격을 이루고 있으며 크로스 본딩이 일정 구간별로 행해졌기 때문에 어떤 계통보다도 정확한 영상분 임피던스 실측치를 구할 수 있으리라 판단된다. 그러므로 본 논문에서는 영상분 임피던스 계산시 일정 상배열(삼각배열, 수평배열)에서 return path의 영향을 고려했을 경우의 계산값과 정상분 임피던스 계산시 시스 순환전류를 고려함에 따른 계산값을 측정치와 비교함으로써 계산의 정확성을 판별하였다.

2. 본 론

2.1 설계용 데이터

본 논문에서 다룬 전압계급은 66kV 1개선로, 132kV 3개선로, 220kV 1개선로이며 상배열은 66kV는 삼각배열과 수평배열로 구성되어 있으며 132kV와 220kV는 모두 수평배열이다 그리고 전체 계통의 주파수는 국외 계통으로 50Hz이다. 선로에 대한 계통데이터는 표 1과 같으며

각 선로별 구간길이는 표 2에 나타내었다. 선로를 전압계급별로 선정한 이유는 전압계급에 따라 적용 케이블이 다르며 케이블의 외경을 비롯한 규격이 선로정수 측정치와 계산치에 충분히 영향을 미칠 수 있기 때문이며 상배열 또한 영향을 크게 주기 때문에 수평배열과 삼각배열이 함께 적용된 66kV선로가 검토되었다.

표 1. 선로 계통데이터

	상간격		도체저항	시스저항	시스외경
	a-b	b-c	[Ω /km]	[Ω /km]	[mm]
66kV	410	410	0.02051	0.304	81
132kV	190	190	0.03115	0.0967	84.5
220kV	450	450	0.01101	0.1548	126.7

표 2. 선로 각 구간 길이

선로 각 구간 길이														
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
66	661	559	656	632	581									
132	690	677	687	705	729	711	721	693	705	699				
220	668	666	611	634	634	638	556	571	464	638	638	638	633	641

표 2에서와 같이 대부분의 선로구간은 일정간격을 유지하고 있으며 전체 길이가 비교적 짧은 선로와 긴선로로 구성되어 있다. 그리고 132kV 데이터는 총 3개선로 중 대표적인 1개 선로에 대해서만 작성하였다.

2.2 임피던스 계산방법

임피던스 계산은 크게 정상분과 영상분으로 나누어 구분하였으며 검토조건은 표 3에 나타내었다.

표 3. 검토조건

정상분	검토조건	
	경우 1	시스 순환전류를 고려할 경우
영상분	경우 2	시스 순환전류를 무시할 경우
	경우 3	시스와 대지로 귀로할 경우
	경우 4	시스로 귀로할 경우
	경우 5	대지로 귀로할 경우

표 3의 검토조건에서 선로에 대해 정상분보다 영상분 임피던스가 계통에 대한 평가에 중요한 부분이므로 본 논문에서는 영상분 임피던스 검토조건을 중점적으로 다루었다. 그리고 본 논문에서는 지중 케이블 선로정수 계산 관련 기본 수식은 Electrical Transmission and Distribution Reference book을 참조하여 정립하였다.

2.2.1 임피던스 계산식

정상분 임피던스 계산식은 선로 계통데이터를 바탕으로 작성되었으며 시스 순환전류 검토조건 따르면 수식은 식(1), (2)와 같다.

$R = R_c$: 시스 순환전류를 무시할 경우 (1)

$$R = R_c + \frac{X_m^2 \times R_s}{R_s^2 + X_m^2} : \text{시스 순환전류를 고려할 경우} \quad (2)$$

여기서,

$$X_m = 4\pi f \times \ln\left(\frac{4 \times S1}{Ds1 + Ds2}\right) \times 10^{-4}$$

X_m : 도체와 시스간의 상호리액턴스성분

$S1$: 도체중심간의 거리

$Ds1$: 금속시스 내부직경

$Ds2$: 금속시스 외부직경

또한 리액턴스성분은 수식(3) (4)와 같다.

$$X = 4\pi f \times \ln\left(\frac{GMD_{3C}}{GMR_{1C}}\right) \times 10^{-4} \quad \text{시스 순환전류 무시할 경우} \quad (3)$$

$$X = 4\pi f \times \ln\left(\frac{GMD_{3C}}{GMR_{1C}}\right) \times 10^{-4} - \frac{X_m^3}{R_s^2 + X_m^2}$$

시스 순환전류를 고려한 경우 (4)

영상분 임피던스 계산식에서 고려한 사항은 대지귀로로 시스와 대지를 고려한 경우로서 검토조건에 따르면 수식(5),(6),(7)과 같다.

$$Z_0 = Z_c - \frac{Z_m^2}{Z_s} \quad \text{시스와 대지로 귀로할 경우} \quad (5)$$

$$Z_0 = Z_c + Z_s - 2 \cdot Z_m \quad \text{시스로 귀로할 경우} \quad (6)$$

$$Z_0 = Z_c \quad \text{대지로 귀로할 경우} \quad (7)$$

여기서

Z_c, Z_s, Z_m 은 도체와 시스의 자기 임피던스와 상호임피던스를 의미한다.

$$Z_c = R_c + R_e + j3 \times 4\pi f \times \ln\left(\frac{De}{GMR_{3C}}\right) \times 10^{-4}$$

$$Z_s = R_s + R_e + j3 \times 4\pi f \times \ln\left(\frac{De}{GMR_{3S}}\right) \times 10^{-4}$$

$$Z_m = R_e + j3 \times 4\pi f \times \ln\left(\frac{De}{GMR_{3c-3s}}\right) \times 10^{-4}$$

2.3 실선로 측정 데이터

선정된 5개 선로의 선로정수 측정값은 정상분의 경우 말단 3상 common 비접지, 영상분의 경우 말단 3상 common 접지를 실시하여 각 상전압, 상전류와 역률을 측정하여 각각 도출하였으며 측정치는 표 4와 같다.

표 4. 선로정수 측정치

	Z_c	Z_0	R_{dc}	C
66kV	0.02+j0.1866	0.1433-j0.0522	0.0151	0.3464
	0.1802[Ω/km]	0.0703[Ω/km]		
	0.035+j0.228	0.123-j0.085		
132kV	0.2307[Ω/km]	0.1495[Ω/km]	0.0265	0.196
	0.0795+j0.139	0.123-j0.0844		
	0.16013[Ω/km]	0.14917[Ω/km]	0.0249	0.202
	0.037+j0.2259	0.2259-j0.0865		
	0.2891[Ω/km]	0.24189[Ω/km]		
220kV	0.0163+j0.191	0.144-j0.169	0.007836	0.235
	0.19169[Ω/km]	0.22203[Ω/km]		

2.3 계산치와의 비교분석

먼저 66kV 선로는 대부분의 구간이 flat배열(a-b, b-c : 410mm)이지만 그중 일부 구간이 trefoil배열(a-b, b-c : 91mm)을 하고 있는 상황이므로 두 배열에 대해 각각 결과를 크기와 오차율로 나누어 비교하였으며 표 5에 나타내었다.

표 5. 임피던스 결과 및 오차율 비교(1)

66	배열	Z[Ω/km]		Error[%]				
실측	계산	0.02+j0.1787		0.1802	Z	R	X	
		경우 1	0.02+j0.22	0.2188	17.6	14.1	17.9	
		경우 2	0.08-j0.19	0.2048	12.0	70.7	5.2	
		trefoil	경우 1	0.02+j0.11	0.1106	62.9	14.1	64.4
			경우 2	0.03-j0.11	0.1111	62.2	22.4	67.1

66	배열	Za[Ω/km]			Error[%]		
실측		0.1433-j0.0522		0.0703	Z	R	X
계산	flat	경우 3	0.31-j0.12	0.3263	78.5	95.4	35.8
		경우 4	0.32-j0.05	0.3289	78.6	95.6	28.3
		경우 5	0.20-j1.63	1.6428	95.7	92.8	95.8
	trefoil	경우 3	0.31-j0.10	0.3278	78.6	95.4	32.2
		경우 4	0.32-j0.05	0.3289	78.6	95.6	28.3
		경우 5	0.20-j1.85	1.8596	96.2	92.8	96.3

위의 표 5, 6에서 검토된 선로는 3.3km의 비교적 짧은 단거리 선로로서 정상분은 flat배열의 시스순환전류를 고려한 경우가 trefoil배열보다 실측치에 가깝게 나타났다. 그리고 영상분에서는 귀로를 시스와 대지를 함께 고려한 경우가 가장 측정치와 가깝게 나타났지만 전체적으로 오차율이 크게 나타났다. 66kV 측정값과 계산값의 오차율은 여러 요인들이 존재할 수 있으나 환경적인 부분에서는 대기온도가 40℃가 넘는 고온건조한 조건에 따른 토양의 열적효과가 있었을 것으로 사료되며 이미 여러 논문에서 언급한대로 지중선로에 상배열을 혼용할 경우보다 하나의 상배열로 구성하는 것이 최적이지만 본 선로는 검토된 다른 선로와 다르게 선로의 상배열로서 수평배열과 삼각배열이 혼용된 것도 구조적인 요인이 될 수 있으리라 판단된다.

다음은 132kV와 220kV의 검토선로에 대한 각각의 결과를 검토하였다. 132kV선로는 수평배열로서 상간격이 190mm이며 220kV는 수평배열로서 상간격이 450mm이다.

표 5. 임피던스 결과 및 오차율 비교(2)

132	배열	Z [Ω/km]			Error[%]		
실측		0.035+j0.228	0.2307	Z	R	X	
계산	flat	경우 1	0.031+j0.18	0.1851	24.6	12.4	25.0
		경우 2	0.081+j0.13	0.1546	49.2	56.6	72.9

132	배열	$Z_0[\Omega/\text{km}]$		Error[%]			
실측		0.123-j0.085	0.1459	Z	R	X	
계산	flat	경우 3	0.13-j0.07	0.1472	1.6	3.1	14.1
		경우 4	0.13-j0.07	0.1453	2.9	3.8	23.1
		경우 5	0.21-j1.74	1.7529	91.5	41.1	95.1

표 5. 임피던스 결과 및 오차율 비교(3)

220	배열	Z _c [Ω/km]			Error[%]		
실측		0.0163+j0.191		0.19169	Z	R	X
계산	flat	경우 1	0.011+j0.20	0.2001	4.2	48.0	4.4
		경우 2	0.072+j0.15	0.1667	15.0	77.5	27.2

220	배열	Z ₀ [Ω/km]			Error[%]		
실측		0.144+j0.169		0.22203	Z	R	X
계산	flat	경우 3	0.16+j0.07	0.17897	24.1	11.4	125.9
		경우 4	0.17+j0.06	0.1763	25.9	13.2	182.1
		경우 5	0.19-j1.60	1.60649	86.2	23.7	89.4

표 5와 6에서 검토된 선로는 66kV보다 비교적 긴 장거리 선로이다. 검토 결과에서도 정상분 임피던스가 시스

순환전류를 고려한 경우의 계산값이 측정치와 오차가 적었으며 또한 electrical transmission and distribution reference book에서 정상분의 경우 시스 전류를 고려하지 않고도 대략적으로 추정할 수 있다고 하였으나 본 논문에서 비교해 본 결과 그 오차율이 상당히 큰 것으로 나타났다. 정상분의 경우에도 쿨로로 시스와 대지를 모두 고려한 경우가 개별적으로 고려된 경우보다 오차가 작은 것으로 나타났다. 또한 전체적으로 오차율이 66kV 선로보다 안정된 형태를 보이고 있다.

2.3 열저항

실측치와 계산치에서 확인된 오차율이 발생하는 요인에는 여러 가지가 존재할 수 있으나 선로가 건설된 지역의 주변 환경을 고려했을 때 가장 큰 영향은 주변 온도가 가장 큰 영향으로 작용하였으리라 사료된다. 그러므로 케이블과 시스 외부열저항을 검토해 보았으며 계산식과 FEM(finite Element Method)를 활용하여 검토하였다.

2.3.1 검토조건

검토 조건은 표 6과 같으며 덕트 내 케이블 상배열은 그림 1과 같다. FEM을 활용한 결과는 그림 2와 표 7에 나타내었다.

표 6. 검토조건

항목	열 도전율[W/mK]	항목	열 도전율[W/mK]
native soil	0.5	conductor	381
special backfill	0.8333	insulation	0.286
bedrock	1.4286	outer covering	0.286

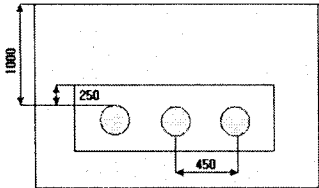


그림 1. 케이블 배열

도체와 시스의 손실은 상도체 간격에 의존하며, 본 논문에서는 검토선로 중 220kV선로의 조건에 따라 FEM 활용하여 검토하였다.

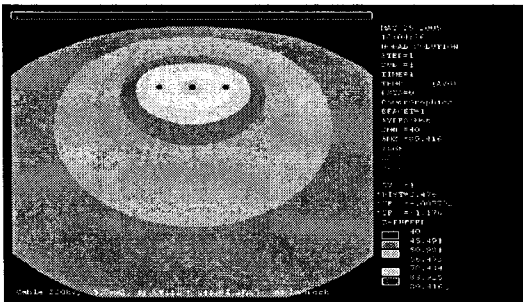


그림 2. 온도분포

표 7. 손실 및 열저항 결과

W_c	W_d	W_s	θ_{con}	θ_{out}	θ_{ref}	T_4	P_{ekv}
W/m	W/m	W/m	℃	℃	℃		Km/W
20.095	0.718	1.270	89.416	81.093	40	1.86	1.7

여기서

W_c : 도체의 단위 길이당 손실

W_d : 절연체의 단위 길이당 유전체 손실

W_s : 시스의 단위 길이당 손실

θ_{con} : 100%부하시 도체의 온도

θ_{out} : 외부 시스의 온도

θ_{ref} : 대기 온도

T_4 : 외부 열저항

P_{ekv} : 토양의 등가 열저항

위의 FEM의 결과와 같이 외부 열저항과 토양의 등가 열저항부분이 환경적인 영향으로 인해 크게 나타났다. 이 결과적인 열저항이 케이블의 선로정수 측정부분에서 오차만큼 영향을 미쳤으리라 판단된다.

3. 결 론

본 논문은 여러 상배열과 공간격을 갖는 국외(대기온도가 항상 40℃이상 되는 환경)의 특정 환경에서 선로정수 측정치의 정확성을 판별하기 위하여 대표적으로 활용되는 선로정수 계산식을 활용하여 오차율을 임피던스의 크기를 활용하여 비교하였다.

즉, 케이블 선로 전체 길이가 수평배열이나 삼각배열 중 하나로 형성되고 전체 구간별 길이, 크로스분당과 접지가 일정할수록 선로정수의 측정치와 계산치의 오차가 작게 나타났다.

또한, 오차가 발생하는 부분은 케이블이 항상 고온의 모래땅속에 매설되어 있기 때문에 토양의 열저항에 의한 영향이 크게 작용했으리라 판단되어 토양 데이터와 케이블 구조데이터에 따라 FEM을 활용하여 토양의 열저항이 어느정도 영향을 미치는지 검토하였으며 열저항에 의해 일정부분 영향을 받는 것으로 판단되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] westinghouse electric corporation, "Electrical Transmission and Distribution Reference book", pp64-95, 1978
- [2] R.Bartnikas, "Power and Communication Cables", pp.449-550, 1999
- [3] J.D.Endacott, H.W.Flack, A.M.Morgan, H.W.Holdup, F.J.Miranda, D.J.Skipper, and M.J.Thelwell, "Thermal design parameters used for high capacity EHV cable circuits." CIGRE, Report 21-03, CIGRE, Paris France, 1970
- [4] J.I.Adams and A.F.Baljet, "Thermal properties of cable backfill materials-laboratory analysis," Ontario Hydro Res. Report, Vol.17, pp.6-13, 1965